

¿PODEMOS MEJORAR LAS ESTIMACIONES DE LAS EMISIONES DE N₂O EN ARGENTINA?

Andrés Said ^{1*}, Gabriela Posse ², Sebastián Vangeli ^{2,3}, Azul Popper ⁴

¹ Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

² Instituto de Clima y Agua, CIRN, CNIA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

³ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

⁴ Dirección de Producciones Sostenibles, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca

RESUMEN

La utilización de factores de emisión por defecto y de forma homogénea en todo el país en la estimación de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) derivadas de la aplicación de fertilizantes sintéticos en los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Argentina, no permiten reflejar las características productivas locales y sus diferencias regionales. Los objetivos de este trabajo fueron: a) desagregar la información de los datos de nitrógeno (N) sintético aplicado por región, cultivo y clima y b) analizar y sintetizar el estado de situación de la investigación argentina en el desarrollo factores de emisión (FE) locales. Para el primer objetivo se desarrolló una metodología para desagregar el dato de N aplicado por jurisdicción y cultivo. Para el segundo, se realizó una recopilación de trabajos científicos publicados en revistas nacionales e internacionales. Se logró desagregar el dato de aplicación de N por jurisdicción y cultivo mediante el cruzamiento de distintas fuentes de información: el 36,7% del N aplicado a nivel nacional se concentra en la Provincia de Buenos Aires, el 26,3 % en Córdoba, el 12% en Santa Fe y el 7,3% en Entre Ríos. El maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) son los cultivos con mayor aplicación de N (33,9 y 23,3%, respectivamente). Por otro lado, encontramos 11 trabajos que permiten proponer FE para estimar emisiones directas de N₂O a partir de datos experimentales, y 15 que permiten estimar las fracciones de volatilización o lixiviación que resultan en emisiones indirectas de N₂O. Los valores promedio estimados y reportados a partir de la bibliografía fueron: 0,0124 kg N₂O-N (kg N)⁻¹ (FE directas de N₂O), 0,081 kg N volatilizado (kg N)⁻¹ (fracción de volatilización) y 0,244 kg N (kg N)⁻¹ (fracción de lixiviación). Estos valores promedio difieren en hasta un 25% con los utilizados actualmente en el Inventario Nacional.

Palabras clave: IPCC, agricultura, GEI, fertilizantes nitrogenados

CAN WE IMPROVE THE ESTIMATES OF N₂O EMISSIONS IN ARGENTINA?

* Autor de contacto:
andresdsaid@gmail.com

Recibido:
10-02-23

Recibido con revisiones:
01-06-23

Aceptado:
02-06-23

ABSTRACT

Nitrous oxide (N₂O) emission estimation derived from the application of synthetic fertilizers using default emission factors and in a homogeneous way throughout the country for the Inventories of Greenhouse Gases of Argentina do not reflect local productive characteristics and the regional differences. The objectives of this study were a) to disaggregate synthetic nitrogen (N) data by region, crop and weather, b) to analyze and synthesize the state of the art of research in Argentina about the development of local N₂O emission factors (FE) for synthetic fertilizers application. For the first objective, a methodology was developed that consists of multiplying the average N dose applied per region by the area sown per crop. For the second,

a compilation of scientific papers published in national and international journals was carried out. It was possible to disaggregate the N application data by district and crop by crossing different sources of information: 36.7% of N at country level is applied in the Province of Buenos Aires, 26.3% in Córdoba, 12% in Santa Fe and 7.3% in Entre Ríos. Corn (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) are the crops with the highest application of N (33.9 and 23.3% respectively). Concerning the state of the art of local research, we found 11 papers that allow us to propose FE for direct N₂O emissions, and 15 that allow us to estimate volatilization or leaching fractions that result in indirect N₂O emissions. The average values estimated and reported from the literature were 0.0124 kg N₂O-N (kg N)⁻¹ (direct N₂O emission factors), 0.081 kg N volatilized (kg N)⁻¹ (volatilization fraction) and 0.244 kg N (kg N)⁻¹ (leaching fraction). Compared to the values used in the National Inventory, the difference is up to 25%.

Keywords: IPCC, agriculture, GHG, nitrogen fertilizers

INTRODUCCIÓN

El óxido nitroso (N₂O) es el principal gas de efecto invernadero (GEI) emitido en sistemas agrícolas de secano, con un poder de calentamiento global de 310 veces el del dióxido de carbono (IPCC, 1995), y es el principal responsable antrópico del daño a la capa de ozono (Bates et al., 2008; Ravishankara et al., 2009). La mayoría de las emisiones antrópicas de N₂O se generan en el suelo, a partir de los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación, que utilizan amonio (NH₄⁺) y nitrato (NO₃⁻) del suelo como sustrato. La nitrificación es un proceso por el cual las bacterias nitrificantes oxidan el NH₄⁺ a nitrito (NO₂⁻). La oxidación de NH₄⁺ es un proceso aerobio, pero cuando la provisión de oxígeno (O₂) es limitada, se genera N₂O. Por otro lado, la desnitrificación es un proceso en el cual las bacterias reducen el NO₃⁻ a gas nitrógeno (N₂), liberando N₂ y N₂O. Ambos procesos son influenciados por la disponibilidad de O₂, pH del suelo y contenido de nitrógeno (N) en el suelo, siendo la fertilización nitrogenada uno de los principales causantes de la emisión directa de N₂O (Blagodatskaya et al., 2014; Dobbie & Smith, 2001; Firestone & Davidson, 1989; Stuart et al., 2014). La aplicación de fertilizantes nitrogenados genera emisiones de N₂O directas e indirectas. Las indirectas ocurren cuando una parte del N del fertilizante aplicado al suelo se pierde a través de la volatilización, lixiviación y/o escorrentía, y posteriormente resulta en emisiones de N₂O, e incrementan las emisiones directas ya producidas por el agregado de N (Food and Agriculture Organization [FAO], 2015). La fertilización nitrogenada aumenta las pérdidas de N por volatilización de amoníaco (NH₃) y otros óxidos de N (NO_x), y parte del NH₃ liberado a la atmósfera se deposita luego en otros lugares pudiendo generar emisiones indirectas de N₂O. Además, el N (principalmente en forma de NO₃⁻) que se pierde por lixiviación o escurrimiento puede contaminar las aguas subterráneas, las zonas ribereñas y los cursos de agua, causando eutrofización y generando emisiones de N₂O indirectas por nitrificación o desnitrificación en dichos lugares (Sheldrick et al., 2002).

En el actual contexto de cambio climático, es crucial contabilizar las emisiones de GEIs de manera precisa, para comparar el impacto de diferentes prácticas de manejo y recomendar opciones más sostenibles. Los países firmantes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), entre los cuales se encuentra Argentina, tienen el compromiso de informar sus fuentes de emisión y absorción de GEI. Para ello, existen niveles de complejidad, donde a medida que se alcanzan niveles mayores, se mejora la exactitud de las estimaciones y se reduce la incertidumbre, aunque los recursos necesarios también son mayores (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2006).

Actualmente, las emisiones directas e indirectas de N₂O producto de las aplicaciones de fertilizantes sintéticos en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Argentina fueron estimadas con el método de cálculo de Nivel 1 de las Directrices del IPCC 2006 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable [MAyDS], 2022). Es decir, se utiliza el cálculo metodológico más básico, que consiste en estimar las emisiones de N₂O a partir de la cantidad anual de N aplicado a nivel nacional, y los factores de emisión (FE; kg N-N₂O emitido por kg de N fertilizado) por defecto propuesto por IPCC a partir de la recopilación de datos científicos internacionales (Tabla 1). Los FE representan qué proporción del N que se fertiliza (o aporta indirectamente), se emite como N₂O. Por su parte, las fracciones de volatilización y lixiviación estiman cuánto del N fertilizado se pierde a través de la volatilización (Frac_{GASF}) o lixiviación (Frac_{LIXIVIACION}). Se supone que el N perdido por esas vías luego se deposita en el suelo o en el agua y parte de eso se emite como N₂O en ese lugar de deposición en proporciones que se estiman con los FE de volatilización (FE₄ en la Tabla 1) y de lixiviación (FE₅). Los FE y las fracciones de volatilización y lixiviación utilizadas en las ecuaciones de cálculo de nivel 1 no tienen en cuenta las características locales en cuanto a suelos, clima y manejo, las

cuales influyen sobre las tasas de emisión. Es decir, no reflejan las características productivas o tendencias únicas de un país a lo largo del tiempo, excepto los cambios en la cantidad de N sintético aplicado como fertilizante. Una de las limitantes para poder mejorar la estimación consiste en que la información de fertilizantes aplicados se obtiene a partir reportes de la Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA), la cual se encuentra agregada a nivel nacional. Esto impide distinguir la cantidad de N aplicado para una determinada región donde se considere apropiado aplicar FE o fracciones diferentes.

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de emisiones de N₂O producto de la aplicación de fertilizante sintético (IPCC, 2006).

Table 1. Equations for calculating N₂O emissions from the application of synthetic fertilizers (IPCC, 2006).

Fuente	Ecuación
Directas de N ₂ O	$F_{sn} * FE_1 * \frac{44}{12}$
Indirectas por volatilización	$F_{sn} * FRAC_{gasf} * FE_4 * \frac{44}{12}$
Indirectas por lixiviación	$F_{sn} * FRAC_{lixiviación} * FE_5 * \frac{44}{12}$

F_{SN} = cantidad anual de N aplicado a los suelos en forma de fertilizante sintético, kg N año⁻¹. FE_1 = factor de emisión para emisiones de N₂O de aportes de N, en kg N₂O-N (kg aporte de N)⁻¹. FE_4 = factor de emisión correspondiente a las emisiones de N₂O de la deposición atmosférica de N en los suelos y en las superficies del agua en kg N₂O-N (kg NH₃-N + NOx-N volatilizado)⁻¹. $FRAC_{GASF}$ = fracción de N de fertilizantes sintéticos que se volatiliza como NH₃ y NOx, en kg N volatilizado (kg de N aplicado)⁻¹. FE_5 = factor de emisión para emisiones de N₂O por lixiviación y escurrimiento de N, en kg N₂O-N (kg N por lixiviación y escurrido)⁻¹. $FRAC_{LIXIVIACIÓN}$ = fracción de todo el N agregado a/mineralizado en suelos gestionados en regiones donde se produce lixiviación en kg N (kg de agregados de N)⁻¹.

El método de nivel 2 del IPCC, que mantiene la estructura del nivel 1, es más preciso ya que utiliza FE locales que reflejan las circunstancias específicas del país o región. Además, permite cuantificar el efecto de implementar prácticas de mitigación potenciales (e.g., el uso de fertilizantes con inhibidores). Sin embargo, los FE específicos de un país son difíciles de desarrollar, dado que sólo pueden construirse cuando existe disponibilidad de mediciones de GEI a campo y datos que permitan estratificar la información de modo que sea lo más detallada posible y espacialmente explícita (Mathivanan et al., 2021). Este nivel de cálculo requiere FE locales, cuya estimación debería provenir de estudios científicos en los que se hubieren realizado mediciones de la emisión de N₂O en las principales situaciones productivas características del país.

Dos trabajos recientes han estudiado la variabilidad espacial de las emisiones de N₂O en Argentina (Cantesana et al., 2020; Said et al., 2022;). Said et al. (2022) distinguieron las emisiones entre climas secos y húmedos, pero consideraron dosis de aplicación fijas por cultivo en función de sus requerimientos nutricionales. Por otro lado, Cantesana et al. (2020) proporcionan mejor información espacial presentando valores de emisión a nivel provincial. Sin embargo, consideramos que existe margen para mejorar esta información, mediante una revisión de algunos supuestos utilizados en el análisis. En el estudio de Cantesana et al., (2020) se asumió que en Argentina no se aplica fertilizante nitrogenado al cultivo de soja por su capacidad de fijación biológica. Sin embargo, un relevamiento realizado por la Bolsa de Cereales (Bolsa de Cereales, 2022) identifica dosis bajas de N aplicadas en soja, asociadas a aplicaciones de fertilizantes con mezclas de nutrientes como el fosfato diamónico o monoamónico. Dada la extensión de la superficie agrícola argentina sembrada con soja, esto suma una magnitud de aplicación de N no despreciable. Además, consideramos que es importante incluir en el análisis especies cultivadas que requieren altas dosis de N, como el algodón, que no fue tenido en cuenta en esa publicación. Por lo tanto, hay posibles aproximaciones para mejorar estas estimaciones, utilizando dosis de aplicación por cultivo y región más precisas en el inventario nacional.

Las emisiones netas totales de GEI estimadas en Argentina para el año 2018 fueron de 366 MtCO₂eq (Megatoneladas de CO₂ equivalente, unidad de medición que permite estandarizar el potencial de calentamiento global de los diferentes GEIs, cuyo poder de calentamiento es distinto). Las emisiones de N₂O resultantes de la aplicación de fertilizantes nitrogenados sintéticos para dicho año se estimaron en 7,45 MtCO₂eq, lo

que representa el 2,03% de las emisiones nacionales. Las tres fuentes responsables de las emisiones de N₂O por la aplicación de fertilizantes sintéticos son: I) 5,62 MtCO₂eq de las emisiones directas de N₂O, II) 1,27 MtCO₂eq de las emisiones indirectas de N₂O por lixiviación de NO₃⁻, y III) 0,56 MtCO₂eq de las emisiones indirectas de N₂O por volatilización de amonio (MAyDS, 2021). Las tres fuentes son consideradas categorías principales en Argentina dado que su magnitud influye significativamente sobre el inventario total de gases de efecto invernadero del país, en cuanto a nivel absoluto o la magnitud de incremento a lo largo del tiempo. En consecuencia, es recomendable priorizar los recursos disponibles para la mejora de sus datos y métodos de estimación, desarrollando métodos de nivel superior más detallados (IPCC, 2006).

Los objetivos de este trabajo fueron desagregar la información de aplicación de nitrógeno por fertilizante por región, cultivo y clima; y analizar la información local disponible que permitiría obtener factores locales de emisión directa (FE₁), Frac_{LIXIVIACIÓN} y la Frac_{GASF}.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desagregación del valor de fertilizantes aplicados

Para desagregar la información de aplicación de N por región y cultivo, se realizó un procedimiento de tres pasos.

Paso 1. Se determinó la dosis de N promedio aplicada por región y cultivo. Para ello, utilizamos la base de datos del "Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada" (RETAA) de la Bolsa de Cereales (2022), la cual cuenta con información desde la campaña 2012/2013. Este relevamiento caracteriza para cada campaña la situación tecnológico-productiva del país, identificando el manejo agronómico y el uso de insumos para los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.) temprano, maíz tardío, soja (*Glycine max* (L.) Merr.) de primera, soja de segunda, girasol (*Helianthus annuus* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.). Estas especies ocupan aproximadamente el 89% de la superficie sembrada de la Argentina. La información se encuentra dividida en 17 regiones agroecológicas del área agrícola nacional, basada en el tipo de suelo y el régimen de precipitaciones. A su vez, se distinguen para cada zona tres niveles tecnológicos (bajo, medio y alto) asociados a la utilización de insumos y prácticas de manejo empleadas. A partir de esta información, se estimó la cantidad de N aplicado por campaña teniendo en cuenta para cada zona y cultivo, la dosis de N ponderada por el nivel tecnológico. Es decir, para cada región, cultivo y año se realizó un promedio ponderado entre los porcentajes de adopción de los niveles de tecnología baja, media y alta, y el valor de N aplicado en cada nivel. En los años sin información de RETAA la dosis se consideró equivalente a la del siguiente año con información disponible. Adicionalmente, se incluyó información sobre los cultivos vinculados a las economías regionales que no están presentes en el relevamiento de la Bolsa de Cereales, tales como el arroz (*Oryza sativa* L.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). En este caso, se optó por realizar consultas a especialistas en estos cultivos en sus regiones características.

Paso 2. Se estimó el N aplicado por año a nivel departamental multiplicando la dosis de fertilización estimada para cada región y cultivo (Paso 1) por la superficie sembrada con cada uno de esos cultivos en cada departamento. La superficie sembrada por cultivo, campaña y departamento se obtuvieron de la base de datos de Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) (2022). La información de la proporción de maíz temprano y maíz tardío sembrado por región y campaña se obtuvo de la Bolsa de Cereales. La superficie sembrada con caña de azúcar se obtuvo de las estimaciones realizadas para el Inventario Nacional de GEIs (MAyDS, 2022).

Paso 3. Cálculo de un coeficiente de ajuste. Se consideró que el valor total nacional de aplicación de fertilizante debe coincidir con el valor informado por la Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA) ajustado por los porcentajes de N de cada tipo de fertilizante. En caso de no coincidir dicho valor con la suma para todo el país del valor de N aplicado obtenido en el paso 2, para cada año se generó un coeficiente de ajuste. Consistió en dividir el valor de fertilizante informado en CIAFA por el fertilizante estimado en el punto 2 total del país. Cada valor obtenido en el punto 2 fue multiplicado por dicho coeficiente. Esta metodología permitió desagregar espacialmente el valor de fertilizante aplicado respetando la magnitud a nivel nacional.

Si bien los datos de aplicación de fertilizantes de la bolsa de cereales y de superficie sembrada del MAGyP se encuentran asociados a campañas agrícolas, el inventario requiere presentar las emisiones por año calendario. Por lo tanto, consideramos que los datos correspondientes a la campaña 2017/18 se asocian a

las emisiones de fertilizantes del 2017. El mismo criterio se consideró para el resto de la serie temporal. El cálculo se realizó anualmente desde el 2012 hasta el 2018.

La clasificación de los departamentos en zonas húmedas o secas se realizó en función del índice de aridez (United Nations Environment Programme [UNEP], 1992) utilizado por Soria et al. (2014) para caracterizar las regiones de Argentina. El índice consiste en la relación entre la precipitación y la evapotranspiración media anual (PP/ETP). Cuando esta relación es > 1 , el distrito corresponde a una región climática húmeda, de lo contrario a una seca.

Estado de situación de investigación en Argentina, síntesis de información, estudios.

Se compilaron los trabajos científicos que han cuantificado las emisiones asociadas a la pérdida de N por aplicación de fertilizantes sintéticos. Para ello se realizaron búsquedas en Scopus y Google Académico utilizando las palabras claves: "agricultura", "Argentina", "óxido nitroso", "volatilización" y "lixiviación". Las palabras claves se buscaron tanto en castellano como en inglés. Se consideraron las publicaciones hasta el 15 de junio del 2022. Se seleccionaron publicaciones de revistas nacionales o internacionales con revisión por pares que reportaron emisiones directas de N₂O o pérdidas de N por volatilización o lixiviación en mediciones directas de campo. De los trabajos obtenidos, se extrajo la información pertinente que nos permitió caracterizar distintos aspectos de los trabajos experimentales realizados. El listado de todos los trabajos seleccionados se presenta como material suplementario. No se tuvieron en cuenta los trabajos de recopilación de datos ya publicados, los puramente metodológicos o los que no informaron claramente los valores estimados experimentalmente. Se descartaron también los trabajos presentados en congresos o revistas de divulgación y los trabajos realizados en macetas o laboratorio. Tampoco se tuvieron en cuenta publicaciones que estimaron las pérdidas de N a partir de ejercicios de modelización.

De la búsqueda bibliográfica se extrajeron los valores reportados de FE_1 , $Frac_{LIXIVIACIÓN}$ o $Frac_{GASF}$. Cuando los valores no estaban reportados específicamente pero podían extraerse las variables para su cálculo a partir de los gráficos, se extrajeron los valores numéricos publicados en las figuras utilizando la herramienta WebPlotDigitizer (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>).

RESULTADOS

Desagregación del valor de fertilizantes aplicados

En el último año del inventario (2018) se estimó una aplicación de 1.157.045 Tn N de fertilizantes sintéticos para todo el país. Para dicho año, la Figura 1 presenta la distribución de aplicación de N por departamento, exceptuando Tucumán, que se agrupa a nivel provincial dado que no se contó con información de superficie sembrada por departamento para caña de azúcar. La Figura 1 presenta la aplicación de N total en cada departamento en el año 2018.

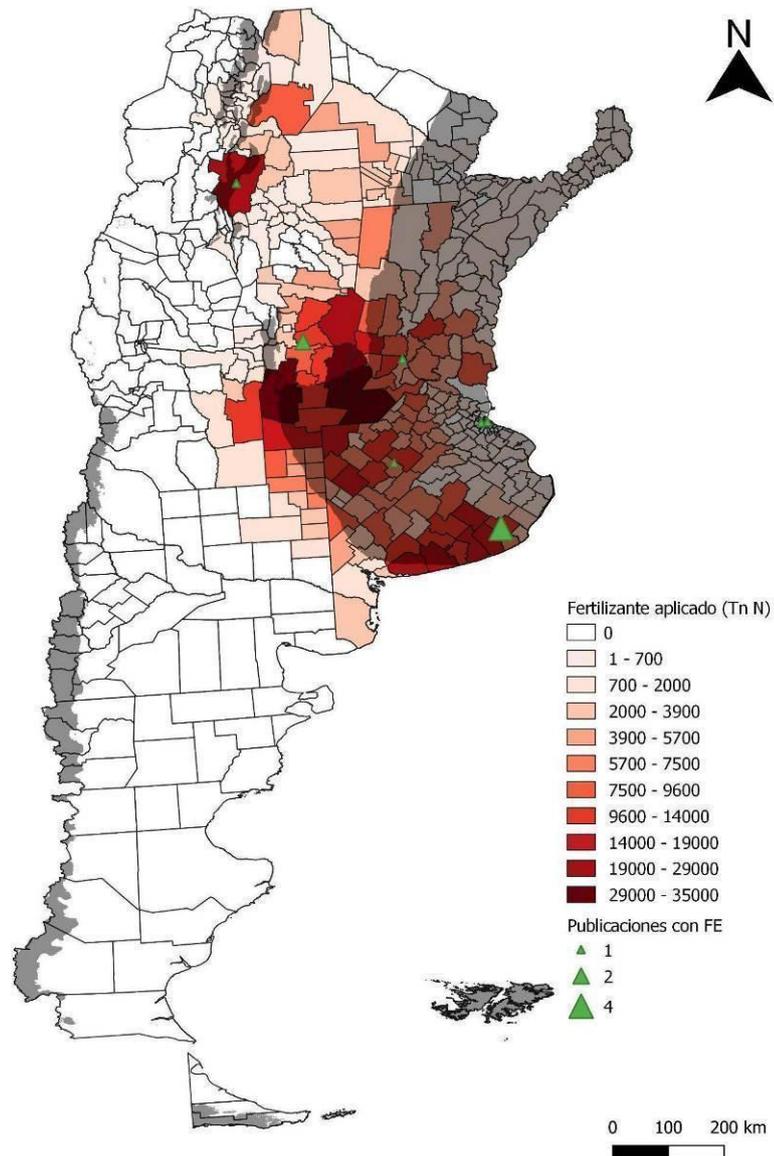


Figura 1. Cantidad total anual de fertilizante nitrogenado (expresada en Tn N) por departamento en el 2018. La zona sombreada corresponde a régimen climático húmedo, mientras que el resto del país se encuentra en zonas de régimen climático seco. Los triángulos verdes indican la ubicación de los ensayos de N₂O en los que se propone o se pudo derivar al menos un factor de emisión. FE=factor de emisión que convierte la cantidad de nitrógeno agregado como fertilizante en el N₂O emitido (kg N-N₂O emitido / kg N aplicado en el fertilizante)

Figure 1. Nitrogen fertilizer application (expressed in Tn N) per department in 2018. The shaded area corresponds to a humid climate regime, while the rest of the country is in areas with a dry climate regime. Green triangles indicate the location of N₂O experiments where at least one emission factor is proposed or could be derived. FE = Emission factor that converts the amount of N applied as a fertilizer in the amount of N emitted as N₂O (kg N₂O-N emitted / kg N fertilized)

En promedio para el período 2012-2018, la contribución porcentual promedio por provincia respecto al total nacional de emisiones de N₂O por la aplicación de fertilizantes sintéticos sigue el siguiente orden: Provincia de Buenos Aires (36,7%), Córdoba (26,3%), Santa Fe (12 %) y Entre Ríos (7,3%) (Figura 2). Esta distribución entre provincias fue relativamente constante a lo largo del período analizado.

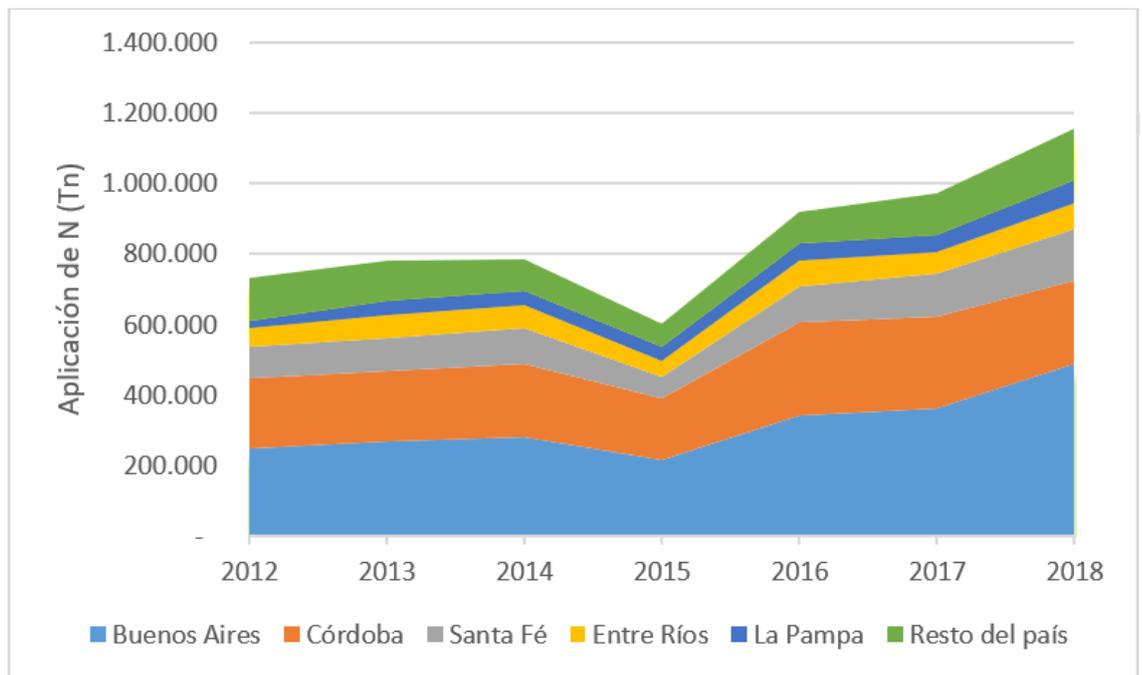


Figura 2. Cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado en las provincias donde la producción agrícola es una de las principales actividades productivas (período 2012-2018).

Figure 2. Nitrogen fertilizer application in the provinces where agricultural production is one of the main productive activities (period 2012-2018).

En promedio para el período 2012-2018, el 33,9% del N aplicado por fertilizantes en el país correspondió a lotes con maíz, el 23,3% a lotes con trigo, el 18,9% a la soja de primera, el 7,8% a la cebada y el 4,4% al girasol (Figura 3). El 11,7% restante se utilizó en lotes con o cacaña de azúcar, algodón, sorgo (*Sorghum sp. Moench*), soja de segunda y arroz. La discriminación de la superficie sembrada por cultivo en el cálculo de emisiones de GEI del inventario permite asociar el dato de actividad con FE medidos en ensayos locales para un cultivo determinado. Otra estratificación posible es separar zonas húmedas y secas, ya que en las secas las pérdidas por lixiviación no son consideradas según el nivel 1 de cálculo. Utilizando esta clasificación, el 65,2 % de la aplicación de N se encuentra en zonas húmedas y el 34,8% restante en zonas secas (Figura 1).

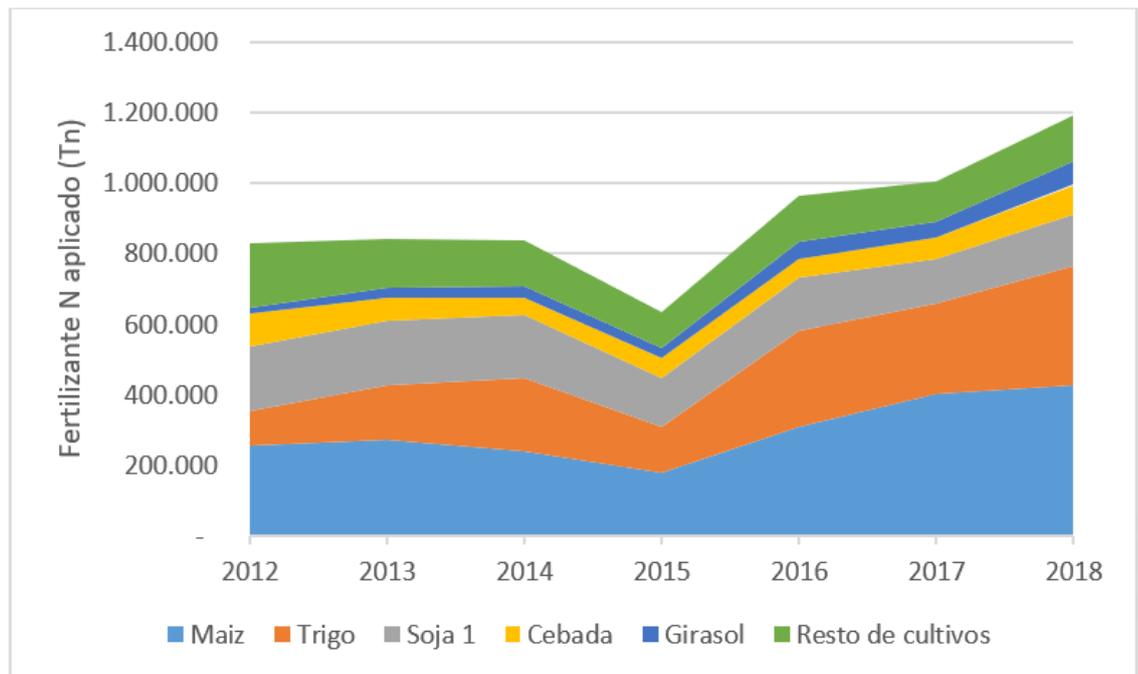


Figura 3. Cantidad total de fertilizantes nitrogenados por cultivo (periodo 2012-2018).

Figure 3. Nitrogen fertilizer application per crop (period 2012-2018).

Desarrollo de FE en Argentina – Estado de situación

Emisiones directas de N₂O.

Encontramos 26 publicaciones que cumplieran con los requerimientos utilizados en las búsquedas. La primera publicación fue en el año 1995 y la última en junio del 2022. Incluyen datos de emisiones de N₂O para 38 situaciones diferentes (teniendo en cuenta especies y tratamientos), ya que en muchos de ellos incluyen mediciones sobre diferentes especies. Así encontramos nueve artículos con datos sobre emisiones en trigo, once sobre maíz, diez sobre soja, cuatro sobre caña de azúcar y uno sobre cebada. Una publicación presenta resultados de mediciones sobre diferentes rastrojos (uno de soja y otro de maíz), tres sobre pastizales tomados como referencia de vegetación natural y en uno también se incluye el monte nativo. La mayoría de los trabajos fueron realizados en Estaciones Experimentales Agropecuarias (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). En cuanto a las regiones, las que cuentan con más información publicada son del sudeste bonaerense (ocho publicaciones de la EEA Balcarce) y la pampa ondulada. El resto de los trabajos presentan datos del Noroeste Argentino (NOA) (cuatro publicaciones de la EEA Famaillá), mesopotamia y pampa interior, pampa semiárida y chaco semiárido. Respecto a los tratamientos comparados, éstos fueron: tipo de labranza, tipo y dosis de fertilizante, diferentes rotaciones, soja inoculada o no inoculada, presencia de plantas o no, monocultivo vs. intercultivos, rastrojos quemados vs. no quemados e intensidad de manejo (intensificado vs. manejo típico). En cuanto a los fertilizantes utilizados en los trabajos reportados, los más utilizados fueron la urea y el urea-nitrato de amonio (UAN). Otros fertilizantes utilizados (un trabajo con cada uno de ellos) fueron el NH₄-NO₃ calcáreo (CAN), fertilizante con 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP), el NH₄-NO₃, el fosfato monoamónico y el NH₄ tiosulfato. Respecto a la duración de los ensayos, los períodos estudiados abarcan desde una estación de crecimiento hasta dos años. La mayoría de los trabajos tiene una frecuencia de medición mensual, y el resto entre cada dos semanas y semanal.

En sólo cuatro de las 26 publicaciones se proponen un factor de emisión propio explícitamente. Uno para maíz (Sainz Rozas et al., 2004), uno para caña de azúcar, con valores para cuatro tratamientos (Chalco Vera et al., 2017), uno para trigo, con valores para tres tratamientos (Vangeli et al., 2022), y un trabajo con valores para cuatro rotaciones diferentes (Piccinetti et al., 2021) (Tabla 2). En otros trabajos, si bien el FE no fue reportado por los autores, los datos informados en las publicaciones nos permitieron estimarlo. Más aún, algunos muestran sus resultados de emisiones acumuladas gráficamente, sin referir los valores numéricos, lo que dificulta el cálculo de los factores de emisión (Álvarez et al., 2022; Ciampitti et al., 2005; Picone et al., 2014; Ponti et al., 2020).

Los valores de FE₁ estimados y reportados a partir de la bibliografía analizada variaron entre 0,004 y 1,75 kg N₂O-N (kg N)⁻¹ (Tabla 2). Dado que el trabajo de Ciampitti et al. (2005) fue uno de los trabajos pioneros en Argentina, pero utilizó una metodología actualmente cuestionable (cámaras muy pequeñas y períodos de muestreo de 24 horas) y los valores calculados son muy superiores a los valores de la bibliografía en general, decidimos no considerar este trabajo para calcular el valor promedio, obteniendo así un valor promedio de 0,0124 kg N₂O-N (kg N)⁻¹. Al considerar el promedio de los muestreos diferenciando zonas húmedas y secas (estudio de Manfredi) los valores promedio resultaron en 0,0128 kg N₂O-N (kg N)⁻¹ y 0,008 kg N₂O-N (kg N)⁻¹, respectivamente. Es decir, en la región húmeda el valor obtenido es inferior al propuesto de 0,016 por el IPCC (2019) y en la zona seca el valor obtenido es superior al de las directrices (0,005). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la región seca solamente cuenta con un único estudio.

Tabla 2. Reporte de factores locales de emisiones directas de N₂O por aplicación de fertilizantes sintéticos según diversos autores para distintos cultivos, sitios y tipos de fertilizantes.

Table 2. Report of local factors of direct N₂O emissions by synthetic fertilizers application according to various authors for different crops, sites and types of fertilizers.

Cultivo	Sitio	Dosis kg N ha ⁻¹	Fertilizante	Otros tratamientos	Valor kg N ₂ O- N (kgN) ⁻¹	Fuente		
caña de azúcar	Famaillá	110	UAN	Con quema	0,0099	Chalco Vera et al., 2017		
				Sin quema	0,0087			
				Quema y lluvioso	0,0176			
				Sin quema, lluvioso	0,0104			
cebada	Balcarce	132,5	urea	intensificado	0,005	Casanave Ponti et al., 2020*		
		93,4		tradicional	0,008			
maíz	Manfredi	107	UAN + tio- sulfato de amonio	siembra directa	0,004	Alvarez et al., 2012*		
				labranza reducida	0,012	Alvarez et al., 2022*		
	Balcarce	50	urea	tradicional	0,010	Picone et al., 2021*		
				60	UAN		intensificado	0,009
				50	urea		tradicional	0,011
				60	UAN		intensificado	0,010
	Balcarce	210	urea	-	0,0114	Sainz Rozas et al., 2004		
	rotación	Oliveros	no definido	no definido	soja-soja	0,012	Piccinetti et al., 2021	
CC-soja					0,013			
trigo-soja/maíz					0,008			
trigo/soja-CC/maíz					0,008			
soja	FAUBA	15	Urea líquida	sin inocular	0,59	Ciampitti et al., 2005*		
		30			0,64			
		15		inoculadas	1,75			
		30			1,27			
trigo	Balcarce	120	urea	-	0,022	Picone et al., 2014*		
	Carlos Casares	149	UAN	-	0,005	Posse et al., 2018*		
	CNIA	60	CAN	-	0,025	Vangeli et al., 2022		
			DMPP	-	0,031			
			UAN	-	0,021			

CAN: nitrato de amonio calcáreo (denominado comúnmente CAN por sus siglas en inglés); DMPP: fertilizante que incluye el inhibidor de la nitrificación 3,4-Dimethylpyrazole phosphate; UAN: urea y nitrato de amonio (denominado comúnmente UAN por sus siglas en inglés); EEA: Estación Experimental Agro-

pecuaria; FAUBA: Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, CNIA: Centro Nacional de Investigación Agropecuaria; CC: cultivo de cobertura.

* calculados a partir de tablas o estimados de figuras en trabajos publicados

Emisiones indirectas por volatilización.

Los trabajos de volatilización seleccionados fueron 12, ocho de los cuales fueron publicados en revistas internacionales y cuatro en revistas nacionales. El primero de los trabajos seleccionados fue publicado en el año 1998, mientras que el último es de 2022. Estas 12 publicaciones totalizaron 19 experimentos, debido a que algunos trabajos tienen datos de más de un experimento/campaña.

La mayoría de los trabajos fueron realizados sobre el cultivo de maíz (11), seguido de trigo (2) (uno de los trabajos tuvo un ensayo en cada cultivo), y en un caso se midió sobre una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R.Dewey). Los fertilizantes usados en los ensayos fueron: urea (12), urea con inhibidores (NBPT) o recubierta (NSN) (4), UAN (2), CAN (2), nitrato de amonio (1), Isobutilendiurea (IBDU) (1) y nitrato de amonio + inhibidor (1, DMPP). Los tratamientos comparados fueron: la dosis de N aplicado (8), la fuente de N (7), el momento de aplicación (3), la forma de aplicación (2 en superficie o incorporado), el sistema de labranza (1) y la incorporación o no de riego (1). En promedio, la duración de los ensayos fue de 27 días, aunque sólo en tres ocasiones el periodo de monitoreo fue mayor que un mes. Excepto en los experimentos más extensos (de 99 y 150 días), en todo el resto la frecuencia de medición fue diaria en los primeros días luego de la aplicación y luego fue disminuyendo con el pasar de los días.

La totalidad de los experimentos reporta un valor acumulado de pérdida de volatilización para el periodo estudiado, y, a excepción de un ensayo de maíz, todos los trabajos cuentan con un testigo sin fertilización. Por lo tanto, es posible calcular la $\text{Frac}_{\text{GASF}}$ de 11 de las 12 publicaciones, aunque sólo en un caso se reporta explícitamente (Vangeli et al., 2022) (Tabla 3). Los valores de $\text{Frac}_{\text{GASF}}$ estimados y reportados a partir de la bibliografía analizada fueron entre 0 y 0,336 kg N volatilizado $(\text{kg N})^{-1}$ con un promedio de 0,081. Sin embargo, estos valores difirieron según el tipo de fertilizante, siendo 0,115 kg NH_4^+-N $(\text{kg N})^{-1}$ el promedio para urea, 0,016 para los fertilizantes basados en nitrato de amonio (CAN y nitrato de amonio), y 0,0085 para la urea con inhibidores (NSN y NBPT). Estos valores son semejantes, aunque algo menores a los propuestos por IPCC (2019): 0,5 para urea, 0,05 para los fertilizantes basados en nitrato de amonio.

Tabla 3. Fracción de volatilización obtenida de publicaciones científicas locales. Para cada uno de los estudios recopilados, se especifica el cultivo, el sitio, la dosis de aplicación, la existencia de otros tratamientos además de la fuente de N, y la fuente de obtención de los datos.

Table 3. Volatilization fractions for the application of different N sources obtained from local scientific publications. For each of the studies collected, crop, site, application dose, existence of other treatments in addition to N source, and source of obtaining the data are specified.

Cultivo	Sitio	Dosis kgN*ha ⁻¹	Fertilizante	Otros tratamiet- nos	Fracción de vola- tilización kg N volatiliza- do(kgN) ⁻¹	Fuente
maíz	Alberti	60	urea	-	0,1614	Alvarez et al., 2007*
		70			0,2429	
		140			0,2184	
	Balcarce	70	urea	-	0,056 – 0,065	Barbieri et al., 2003*
			CAN		< 0,010	
			Urea incorporada		< 0,001	
	Balcarce	60	urea	-	0,080	Barbieri et al., 2018a*
					120	
		60	UAN		0,0333	
					120	
	Balcarce	120	urea	-	0,038 – 0,110	Barbieri et al., 2018b*
			Urea+NSN		0,004 – 0,021	
	CNIA	60	urea	SD inc	0,115	Palma et al., 1998*
				SD sup	0,065	
				LC inc	0,054	
				LC sup	0,086	
Chivilcoy	70	urea	-	0,246	Rimski-Korsakov et al., 2012*	
	140			0,203		
	270			0,154		
FAUBA	140	Nitrato de amonio	Con Riego	0,039	Rimski-Korsakov et al., 2016*	
			Sin Riego			
Balcarce	70	urea	-	0,026 – 0,090	Sainz Rozas et al., 1999*	
		Urea +NBPT		0,003 – 0,022		
	140	urea		0,051 – 0,116		
		urea+NBPT		0,002 – 0,010		
		210		urea		0,082 – 0,113
				urea+NBPT		0,003
trigo	CNIA	69	CAN	0,0003	Vangeli et al., 2022	
		DMPP	0,0013			
		UAN	0,0356			
Chivilcoy	110	urea	-	0,0169	Zubillaga et al., 2002*	
		UAN		0,0472		
		IBDU		0,000		
pastura agropiro	Balcarce	urea	-	0,124 – 0,219	Barbieri y Echever- ría, 2003*	
				180		0,181 – 0,336

CAN: nitrato de amonio calcáreo (denominado comúnmente CAN por sus siglas en inglés); UAN: urea y nitrato de amonio (denominado comúnmente UAN por sus siglas en inglés); NBPT: fertilizante que incluye el inhibidor de la nitrificación N-(n-Butyl)thiophosphoric triamida; NSN: fertilizante que incluye al inhibidor

; IBDU: Isobutilendiurea, fertilizante nitrogenado de liberación lenta; CNIA: Centro Nacional de Investigación Agropecuaria; FAUBA: Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires; INC: aplicación de urea incorporada; ; SUP: aplicación de urea en superficie; LC: labranza convencional; SD: siembra directa

* calculados a partir de tablas o gráficos de resultados de trabajos publicados

Emisiones indirectas por lixiviación.

Los trabajos de lixiviación seleccionados fueron 13, 12 de los cuales fueron publicados en revistas internacionales y uno en una revista nacional. El primero de los trabajos seleccionados fue publicado en el año 2002, mientras que el último es de 2018. Todos los trabajos fueron realizados en la región pampeana, exceptuando uno en la Patagonia y uno en el NOA.

La mayoría de los trabajos fueron realizados sobre el cultivo de maíz (6), seguido de rotaciones de maíz con soja, trigo, papa (*Solanum tuberosum* L.) o avena (*Avena sativa* L.) (5), un trabajo se realizó en caña de azúcar y uno en cerezos (*Prunus avium* L.). Los fertilizantes usados en los ensayos fueron: urea (6), UAN (2), urea y UAN (2), sulfato de amonio (1), nitrato de calcio (1) y en uno no fue especificado. Los tratamientos analizados fueron la dosis de N aplicado (6), la dosis aplicada y el cultivo (1), el relieve y el cultivo (1), el cultivo (1), y cuatro trabajos relacionados al tipo de manejo (irrigación, cobertura del suelo, historial de fertilización). En promedio, la duración de los ensayos fue de tres años y medio, con experimentos de entre uno y 10 años.

La totalidad de los experimentos reporta un valor acumulado de pérdida de lixiviación para el periodo estudiado. Siete de los ensayos presentan un testigo sin fertilización, y seis no lo presentan. La fracción de N lixiviado sólo es presentada en un trabajo, con el valor de 0,8 kg N (kg N)⁻¹ de nitratos lixiviados pertenecientes al N aplicado por fertilización (Rimski-Korsakov et al., 2012). En otros casos (3) el valor de Frac_{LIXIVIACIÓN} puede desprenderse de tablas mediante cálculos sencillos, teniendo dos trabajos la misma fuente de datos experimentales (presentados en la Tabla 4). Para la realización de los cálculos se emplearon los datos obtenidos hasta 1 m de profundidad, coincidente con los estudios de fracciones lixiviadas empleados por el IPCC (IPCC, 2006; Moreno et al., 1996; Tafteh et al., 2012). El cálculo de la fracción lixiviada no puede ser realizado a partir de los experimentos que no cuentan con tratamientos testigo (7), y en los restantes dos trabajos la fracción no puede ser calculada en base a la información brindada.

Los valores de Frac_{LIXIVIACIÓN} (en kg N (kg N)⁻¹) estimados y reportados a partir de la bibliografía analizada varían entre 0,009 y 0,8 kg N (kg N)⁻¹, siendo en promedio 0,244 kg N (kg N)⁻¹, resultado muy similar al presentado por el IPCC para zonas húmedas de 0,24 kg N (kg N)⁻¹ (IPCC, 2019). En todos los casos el cultivo en el que fue estudiado fue maíz, y se presentaron datos tanto para urea como para UAN.

Tabla 4. Fracciones de lixiviación locales de emisiones indirectas de N₂O por fertilizantes sintéticos según diversos autores para distintos cultivos, sitios y tipos de fertilizantes.

Table 4. Local leaching fractions for indirect N₂O emissions from synthetic fertilizers according to various authors for different crops, sites and types of fertilizers.

Cultivo	Sitio	Dosis	Fertilizante	Valor	Fuente
		kg N*ha ⁻¹		kg N (kg N) ⁻¹	
maíz	Alberti	60	urea	0,009	Álvarez. et al., 2007*
		70		0,24	
		106		0,06	
		140		0,23	
	Balcarce	100	UAN	0,15	Aparicio. et al., 2008*
		200	UAN	0,22	Aparicio et al., 2015*
	Chivilcoy	-	Urea	0,8	Rimski-Korsakov et al., 2012

* calculados a partir de tablas o gráficos de resultados de trabajos publicados

DISCUSIÓN

La propuesta metodológica desarrollada en este trabajo para desagregar los datos de aplicación de fertilizante nitrogenado sintético por jurisdicción, cultivo y clima permite mejorar la estimación del nivel 1 de cálculo al ajustar los FE o las fracciones de lixiviación por región climática húmeda y seca. Según el último informe de Argentina, en 2018 se reportaron 1,27 MtCO₂eq de emisiones por lixiviación de N proveniente de fertilizante sintético nitrogenado con la metodología IPCC (2006) (MAyDS, 2022). Si se hubiera considerado que el 33% de la aplicación de fertilizante se efectúa en zonas secas, las emisiones estimadas se reducirían a 0,85 MtCO₂eq, ya que el nivel 1 considera que la lixiviación ocurre únicamente en regiones húmedas. A su vez, sin contar con esta desagregación, incluso contando con FE locales, no sería posible utilizarlos para el cálculo de un nivel 2. La disponibilidad de valores de emisiones a nivel provincial permitiría realizar análisis específicos de la región para contribuir información a la decisión nacional y consecuentemente generar medidas de manejo locales.

Si bien encontramos que existen numerosas publicaciones que reportan emisiones directas de N₂O y pérdidas de N por volatilización y lixiviación, estas no se suelen reportar los factores de emisión y las fracciones de volatilización y lixiviación claramente. En muchos casos el diseño de los experimentos no permite estimar parámetros locales de emisión (FE₁, Frac_{GASF} y Frac_{LIXIVIACIÓN}). En la mayoría de los casos, esto es debido a que no se analizaron valores de referencia para las emisiones (emisiones basales o "background"), lo que impide determinar el componente de emisiones asociado directamente a la aplicación de fertilizantes. Estas emisiones basales se hubiesen podido obtener incluyendo en los ensayos un control sin aplicación de N (Charteris et al., 2020).

Un aspecto no contemplado en las directrices del IPCC es la influencia de la secuencia de cultivos sobre las emisiones. Algunos de los trabajos analizados mencionan este aspecto. Piccinetti et al. (2021) calculan las emisiones y el FE para diferentes rotaciones, haciendo énfasis en el impacto que tiene la secuencia sobre las emisiones de óxido nitroso. Vangeli et al. (2022) también hace referencia a la importancia de tener en cuenta el uso del suelo anterior. Otro aspecto no tenido en cuenta cuando se utilizan factores de emisión fijos (ya sea de nivel 1 o de nivel 2), es la influencia de las condiciones ambientales en las emisiones de cada ciclo productivo. Chalco Vera et al. (2017) calculan los factores de emisión para tres estaciones de crecimiento diferente, poniendo de manifiesto la alta variabilidad de estos valores dependiendo del manejo y de las condiciones ambientales predominantes durante las mismas.

En base a los cálculos realizados a partir de la información recabada, los valores promedio obtenidos localmente en ningún caso difieren más del 25% respecto a los valores por defecto de IPCC (2006) (FE_1 : 0,01; $Frac_{GASF}$: 0,1; $Frac_{LIXIVIACIÓN}$: 0,30). Sin embargo, se identificó una gran variabilidad para cada valor que podría atribuirse al manejo (cultivo, labranza, fertilizante, dosis), las condiciones locales (clima, suelo), e incluso a diferencias metodológicas de medición o diseño de los ensayos. La alta variabilidad pone de manifiesto la importancia de generar FE locales específicos respecto a utilizar FE fijos. Consideramos importante continuar con la investigación sobre el desarrollo de niveles de cálculos avanzados que se ajusten a las condiciones locales y sean sensibles a la adopción de prácticas de mitigación de las emisiones de N₂O.

Es común encontrar investigaciones en las que, a pesar de contar con información suficiente para estimar FE o fracciones de volatilización/lixiviación, este no se calcula. Esto podría deberse a que la motivación principal de los investigadores suele ser el de comprender procesos, poner a prueba hipótesis, estudiar relaciones entre las pérdidas de N y factores ambientales o de manejo, y no generar datos que puedan mejorar los inventarios locales. A su vez, sistemáticamente se encontró información incompleta sobre la descripción de las características del sitio de estudio (e.g. análisis físico y químico del suelo, valores medios de precipitación y temperatura), lo cual dificulta establecer el alcance espacial de los resultados obtenidos y la realización de meta-análisis en el futuro de Klein et al. (2020) recopilan y exponen los datos que se deberían informar en las publicaciones que reportan FE. Potenciales iniciativas de investigación a nivel nacional podrían retomar iniciativas como la de la Red Nacional de Medición y Evaluación de las Emisiones de Óxido Nitroso de Ecosistemas (<http://red-oxido-nitroso.agro.uba.ar/>), donde se coordinen esfuerzos, homologuen protocolos de trabajo y caractericen de manera sistemática los experimentos. Así, los resultados obtenidos con diferentes propósitos serían comparables entre sí, lo cual maximiza el rendimiento de las inversiones de tiempo y dinero que requieren los ensayos a campo.

Para consolidar valores de FE y fracciones de volatilización/lixiviación representativos del país, es necesario no solamente aumentar su número de publicaciones, sino también priorizar los sitios, tipo de suelo, cultivos y manejos en los que es más necesario obtener datos. Para ello, otros países tomaron estrategias como la estratificación del territorio, teniendo en cuenta los factores moduladores de las emisiones (temperatura y precipitaciones medias, tipo de suelo, manejo, principales fuentes de N), y realizaron ensayos que permitieran estimar los FE en cada una de esas regiones. Ese es, por ejemplo, el enfoque del inventario de GEI de Canadá, donde se propone un FE por cada uno de sus ecodistritos, definidos por relieve, geografía, suelos, vegetación, cuerpos de agua y fauna (Environment and Climate Change Canada, 2021). Otro enfoque posible es el de Australia, que define sus FE en base a sistemas productivos (tipo de producción y región climática) (Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources, 2021). Estados Unidos, en cambio, desarrolló para sus principales cultivos un nivel 3 de cálculo del IPCC, empleando el modelo DayCent que estima las emisiones de N₂O en aproximadamente 350 mil puntos a lo largo del país, empleando información de manejo de los cultivos e historial de uso del suelo, datos edáficos y climáticos de cada sitio (United States Environmental Protection Agency, 2021).

CONCLUSIÓN

Las emisiones directas e indirectas de N₂O causadas por la aplicación de fertilizantes sintéticos se consideran categorías principales en el inventario argentino de emisiones de GEI. Por lo tanto, es fundamental trabajar en el desarrollo de métodos de cálculo más avanzados (nivel 2 o 3) que mejoren la confiabilidad de las estimaciones de emisiones y permitan incorporar posibles prácticas de mitigación al inventario nacional. En este trabajo, se propone una metodología que permite estimar el volumen de fertilizante aplicado anualmente a nivel de jurisdicción, lo cual mejora la base de datos utilizada actualmente en el inventario que es a nivel nacional. Además, se presenta un panorama de la investigación local disponible sobre la emisión de óxido nitroso, fracciones de volatilización y lixiviación. Este análisis contribuye a identificar las áreas de investigación necesarias para obtener valores representativos que puedan ser utilizados en el inventario nacional. A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años por investigadores de diversas instituciones (universidades, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), INTA) para obtener factores locales, el trabajo realizado pareciera no ser suficiente como para proponer FE robustos.

Es esencial continuar avanzando en el desarrollo de metodologías de cálculo más precisas y en la generación y recopilación de datos a nivel local para mejorar la estimación de las emisiones de óxido nitroso derivadas de la aplicación de fertilizantes. Esto permitirá fortalecer el inventario nacional de gases de efecto invernadero y brindar una base sólida para la implementación de medidas de mitigación efectivas en Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Fernanda González y a Fernando García por sus propuestas sobre la desagregación del dato de actividad del fertilizante aplicado. Ditmar Kurtz, Martín Acreche, Nestor Gomez, Fernando de Filippi, Gonzalo Scarpin brindaron información de la dosis promedio aplicada en los cultivos de arroz, caña de azúcar y algodón. S. Vangeli es estudiante de doctorado con una beca cofinanciada INTA-CONICET y junto a G. Posse participan del proyecto de la cartera INTA 2019 i058.

REFERENCIAS

- Alvarez, C.R., Rimski-Korsakov, H., Prystupa, P. & Lavado R.S. (2007). Nitrogen dynamics and losses in direct-drilled maize systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38 (15-16), 2045-2059. <https://doi.org/10.1080/00103620701548712>
- Alvarez C., Álvarez C.R., Alves, B. & Costantini A. (2022). Soil nitrous oxide emissions in a maize (*Zea mays* L.) crop in response to nitrogen fertilisation. *Soil Research*, *Csiro Publishing*. <https://doi.org/10.1071/SR21094>
- Alvarez, C., Costantini, A., Álvarez C.R., Alves, B.J.R., Jantalia C.P., Martellotto E.E. & Urquiaga S. (2012). Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. *Nutrient Cycle in Agroecosystems*, 94, 209-220. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9534-9>
- Aparicio, V., Costa, J.L. & Zamora, M. (2008). Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management*, 95(12), 1361–1372. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.003>
- Aparicio, V., Costa, J.L., Sainz Rozas, H., Gimenez, D. & García, F. (2015). Comparing Nitrate-N Losses through Leaching by Field Measurements and Nitrogen Balance Estimations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(10), 1229–1243. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1033533>
- Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources. (2021). National Inventory Report Volume 1. <https://unfccc.int/documents/273478>
- Barbieri, P.A. y Echeverría, H.E. (2003). Evolución de las pérdidas de amoníaco desde urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(1), 17-29.
- Barbieri, P.A., Echeverría, H.E. y Sainz Rozas H.R. (2018a). Pérdidas por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno en maíz en función de la fuente, dosis y momento de aplicación. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 117 (1), 111-116
- Barbieri, P.A., Echeverría, H.E. & Sainz Rozas H.R. (2018b). Nitrogen Recovery Efficiency from Urea Treated with NSN Co-Polymer Applied to No-Till Corn. *Agronomy* 8(8), 154. <https://doi.org/10.3390/agronomy8080154>
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu S. & J.P. Palutikof (Eds.). (2008). Climate Change and Water. Technical Paper - June 2008. International Panel on Climate Change (IPCC), Secretariat Geneva, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-en.pdf>
- Blagodatskaya, E., Zheng, X, Blagodatsky, S, Wiegler, R, Dannenmann, M. & Butterbach-Bahl, K. (2014). Oxygen and substrate availability interactively control the temperature sensitivity of CO₂ and N₂O emission from soil. *Biol. Fert. Soils* 50, 775–783
- Bolsa de Cereales. (2022). Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. <https://www.bolsadecereales.com/datasets>
- Castesana, P. S., Vázquez-Amábile, G., Dawidowski, L. H. & Gómez, D. R. (2020). Temporal and spatial variability of nitrous oxide emissions from agriculture in Argentina. *Carbon Management*, 11(3), 251-263. <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1750229>
- Casanave Ponti, S.M, Videla, C.C., Monterubbianesi, M.G., Andrade, F.H. & Rizzalli, R.H. (2020). Crop intensification with sustainable practices did not increase N₂O emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106828>
- Charteris, A.F., Chadwick, D.R., Thorman, R.E., Vallejo, A., Cecile, A.V., Klein, A.M., Rochette, P. & Cárdenas, L.M. (2020). Global Research Alliance N₂O chamber methodology guidelines: recommendations for deployment and accounting for sources of variability. *Journal of Environmental Quality*. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20126>
- Ciampitti, I.A., Ciarlo, E.A. y Conti, M. (2005). Emisiones de óxido nítrico en un cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]: efecto de la inoculación y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo*, 3(2) 123-131.
- Chalco Vera, J.E., Valeiro, A., Posse, G. & Acreche, M.M. (2017). To burn or not to burn: The question of straw burning and nitrogen fertilization effect on nitrous oxide emissions in sugarcane. *Science of The Total Environment*, 587, 399-406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.172>
- Dobbie, K.E. & Smith, K.A. (2001). The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. *Eur. J. Soil Sci.* 52,667–673.
- Environment and Climate Change Canada. (2021). National Inventory Report 1990-2019: Greenhouse gas sources and sinks in Canada. Part 2. https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/eccc/En81-4-2019-1-eng.pdf
- Firestone, M.K. & Davidson, E.A. (1989). Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. Andreae, M.O., Schimel, D.S. (eds.). New York: Wiley.
- Food and Agriculture Organization. (2015). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo. <https://www.fao.org/3/i4260s/i4260s.pdf>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (1995). SAR Climate Change 1995: Synthesis Report. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-en-1.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., y Tanabe K. (eds). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published: IPCC, Switzerland: Calvo Buendía, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. y Federici, S. (eds). <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Klein, C.M.K., Alfaro, M.A. Giltrap, D., Topp, C.F.E., Simon, P.L., Noble A.D.L. & Van der Weerden, T. J. (2020). Global Research Alliance N₂O chamber methodology guidelines: statistical considerations, emission factor calculation, and data reporting. *Journal of Environmental Quality*, <https://doi.org/10.1002/jeq2.20127>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2022. Informe del Inventario Nacional del Cuarto Informe Bienal de Actualización de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), <https://unfccc.int/documents/461141>.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. (2022). Estimaciones agrícolas. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>
- Mathivanan, G.P., Eysholdt, M., Zinnbauer, M., R'osemann, C. & Fuß, R. (2021). New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107640>
- Moreno, F., Cayuela, J.A., Fernández, J.E., Fernández-Boy, E. J., Murillo, M. & Cabrera, F. (1996). Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural*, [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01256-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01256-5)
- Palma, R.M., Saubidet, M.I., Rimolo, M. & Utsumi, J. (1998). Nitrogen losses by volatilization in a corn crop with two tillage systems in the Argentine Pampa. *Communications in soil science and plant analysis* 29, 2865-2879. <https://doi.org/10.1080/00103629809370161>
- Piccinetti, C.F., Bacigaluppo, S., Di Ciocco, C.A., De Tellería, J.M. & Salvagiotti, F. (2021). Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas region. *Geoderma*, 402, 115192. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115192>
- Picone, L., Videla, C., Picaud, C.L., García, F.O. & Rizzalli, R.H. (2014). Denitrification in a soil under wheat crop in the humid pampas of Argentina. *Scientific Research* 4, 312-322. <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2014.49033>
- Picone, L.I., Bayer, C., Videla, C.C., Rizzalli, R.H., Ponti, S.M.C F, Andrade H., & García, F.O. (2021). Nitrous oxide emissions in maize on mollisols in the Pampas of Argentina. *Geoderma Regional*, 24, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00362>
- Ravishankara, A.R., Daniel, J.S. & Portmann, R.W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science* 326,123–5. <https://doi: 10.1126/science.1176985>
- Rimski-Korsakov, H., Rubio, G. & Lavado, R.S. (2012). Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93, 253–263. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9513-1>
- Said, A., Beltrán, M. & Vázquez-Amábile, G. (2022). Nitrous oxide emission estimation from managed soils in Argentina: differences between IPCC 2006 guidelines and the IPCC 2019 refinement. *Agronomía y Ambiente*, 42, 8–18. <http://agronomiyambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/192>
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E., Studdert, G.A. & Andrade, F.H. (1999). No-Till Maize Nitrogen Uptake and Yield: Effect of Urease Inhibitor and Application Time. *Agronomy Journal* 91(6), 950-955. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.916950x>
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E. & Barbieri, P. (2004). Denitrification in a soil under no-tillage as a function of presence of maize plant and nitrate rate. *Ciencia del Suelo* 22(1): 27-35. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v36n1/v36n1a09.pdf>
- Sheldrick, W.F., Syers, J.K. & Lingard, J. (2002). A conceptual model for conducting nutrients audits at national, regional, and global scales. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 62,61–72 (14). A regional audit of nitrogen fluxes in pampean agroecosystems. Available from: https://www.researchgate.net/publication/259510403_A_regional_audit_of_nitrogen_fluxes_in_pampean_agroecosystems [accessed May 18 2023].
- Soria, D., Rubio, C. y Abraham, E. (2014). Extensión y clasificación de las tierras secas en la República Argentina. En: Torres L, Abraham E y G Pastor (Eds.) "Una ventana sobre el territorio: herramientas teóricas para comprender las tierras secas". EDIUNC. Mendoza, Argentina.
- Stuart, D., Schewe, R. L. & McDermott, M. (2014). Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: Understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. *Land Use Policy* 36, 210–218
- Tafteh, A. & Sepaskhah, A. (2012). Yield and nitrogen leaching in maize field under different nitrogen rates and partial root drying irrigation. *International Journal of Plant Production* 6(1): 93-113. <https://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2012.672>
- United States Environmental Protection Agency. (2021). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2019. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-04/documents/us-ghg-inventory-2021-main-text.pdf>
- United Nations Environment Programme. (1992). World Atlas of Desertification. Oxford University Press. 69 p.
- Vangeli, S., Posse, G., Beget, M.E., Otero Estrada, E., Valdetaro, E., Oricchio, P., Kandus, M. & Di Bella, C.M. (2022). Effects of fertilizer type

on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in wheat and maize crops. Soil Use and Management. <https://doi.org/10.1111/sum.12788>

Zubillaga, M.S., Zubillaga, M.A.M., Urricarriet, S. & Lavado, R.S. (2002). Effect of nitrogen sources on ammonia volatilization, grain yield and soil nitrogen losses in no-till wheat in an Argentine soil. *Agrochimica*, 46 (3-4), 100-107. <http://hdl.handle.net/11336/59248>